

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06052

研究課題名(和文)メタマテリアルアンテナ設計のための電磁界シミュレーション法の開発

研究課題名(英文)Development of Electromagnetic Simulation Method for Metamaterial Antenna Design

研究代表者

宇野 亨(UNO, Toru)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80176718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルを用いたアンテナを正確に設計するためには、協力的な電磁界シミュレーションが不可欠である。本研究では、計算精度を保ちながらも計算機に過度の付加を与えない方法としてFDTD(Finite Difference Time Domain)法を採用することとし、メタマテリアルベースアンテナとメタマテリアルインスパイアードアンテナを効率良く設計するための電磁界シミュレーション法を開発した。また、本研究で開発したメタマテリアルベースアンテナを実環境に応用する場合の計算手法もまた開発した。これらの成果の一部は、研究分担者と共著の数値電磁解析の専門書で紹介した。

研究成果の概要(英文)：It is indispensable for correctly designing metamaterial antennas to develop a powerful electromagnetic simulation method. This research project introduces the finite difference time domain(FDTD) method that maintains a computational accuracy and avoids an excessive load to the computer, develops a electromagnetic simulation method based on the FDTD method for designing metamaterial-based antennas and also metamaterial-inspired antennas. Other electromagnetic simulation method is also developed for effectively analysing a real environments. Some results developed in this research are included in the book of computational electromagnetics which are written together with a research contributor.

研究分野：電磁波工学

キーワード：メタマテリアル アンテナ 計算電磁気学 FDTD法 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルとは分子や原子で構成される一般的な材料ではなく、導体や誘電体といった巨視的性質が主要となる材料で構成された人工的な周期構造体のことである。構造や周期を工夫することにより、これまでに知られていない様々な性質を持たせることができるため、マイクロ波から光に至るまでの広い周波数帯においてその応用分野が広がっている。このようなことから、平成22年度からは新学術領域研究「電磁メタマテリアル」としても取り上げられているが、申請者は研究分担者として参画し、マイクロ波帯メタマテリアルの開発と応用、特にメタマテリアルを利用したアンテナとその設計法の開発を担当してきた。アンテナの設計は無限周期構造の右手/左手系線路の分散関係を調べることによってなされ、最終的な特性は申請者が開発した電磁界シミュレーション法によって計算された。このように、メタマテリアルアンテナにはアンテナ自体にメタマテリアルの概念を取り入れたメタマテリアルベース (Metamaterial-based) アンテナ系と、アンテナ自体は単純な構造のままで、その近傍に周期構造体を置いて全体として特性を向上させるメタマテリアルインスパイアード (Metamaterial-inspired) アンテナ系がある。前者のアンテナは主に導体と誘電体とから成るため、マイクロ波帯では従来の電磁界シミュレータによってその特性を概ね計算することができる。ところが、アンテナの多機能化のために単位セルに線形あるいは非線形回路素子を装荷する場合も少なくない。また、テラヘルツや光の周波数領域では、導体や誘電体は周波数分散性や異方性を示すようになるため、より高周波のメタマテリアルアンテナを開発するには、それらを考慮した電磁界解析法の確立が不可欠である。

一方、メタマテリアルインスパイアードアンテナにおいては、一般に無限周期構造と非周期構造とを含むために、全ての構造を含んだ全体としてのアンテナ特性を完全に解析できる手法は今のところ存在しない。そこで本研究では、メタマテリアルベースアンテナおよびメタマテリアルインスパイアードアンテナの両方に適用可能な電磁界シミュレーション法を開発し、マイクロ波領域から光の領域までのメタマテリアルアンテナの開発に資する。

### 2. 研究の目的

メタマテリアルとは導体や誘電体の周期構造を利用した人工媒質で、これまでに知られていない様々な性質をもつことから、新しいマイクロ波・光デバイス開発の有力な手段として注目されている。本研究はメタマテリアルを利用した多機能情報携帯端末や生体情報センシングデバイス等の開発に必要な電磁界シミュレーション法を確立することを目的とするもので、特にメタマテリアルを利用した

アンテナ (放射器あるいはセンサ) に焦点を絞り、従来のシミュレータでは計算が不可能であった新しい電磁界解析法を、計算精度を重視する観点と、精度を極力保ちながらも計算機に過度の負荷を与えないという観点との両面から研究開発する。

### 3. 研究の方法

本研究では新たな性能をもつ携帯情報端末や人体通信用アンテナ、生体情報センシングデバイスなどを念頭に置きながら、広い周波数範囲に適用できるメタリアルベースアンテナ及びメタマテリアルインスパイアードアンテナ設計のための電磁界シミュレータの開発を行う。このために平成27年度は計算精度を重視する観点から、FDTD法をメインエンジンとする無限周期構造内の非周期アンテナの解析法を開発し、その有効性を数値的・実験的に実証する。後者に関しては、FDTD法だけではなくモーメント法による解析法もまた開発する。さらに、均質化法や伝送線路近似の有効性についても検討を加える。平成28年度以降は、これらの統合と改良を進めるとともに、準厳密なアンテナ設計法と実装環境を考慮した電磁界計算法を開発し、メタマテリアルアンテナ利用機器の設計開発の道筋を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) メタマテリアルベース高利得漏れ波アンテナの開発

将来の自動運転に向けた研究の一環として、車車間通信の研究が開始されている。車車間通信用アンテナとしてはフロントガラスやリアガラスに装着されたガラスアンテナを利用するのが良いと考えられるが、フロントガラスは水平に近い低角へのビーム走査が必要である。本研究では、図1のような周波数によってビーム走査可能な漏れ波アンテナをメタマテリアル技術を応用して開発した。その特性を図2(a), (b)に示す。(a)は左手系領域、(b)は右手系領域である。このように、高い利得を保ったまま広角にビーム走査ができています。ガラスに装着した場合の特性については今後検討してゆきたい。

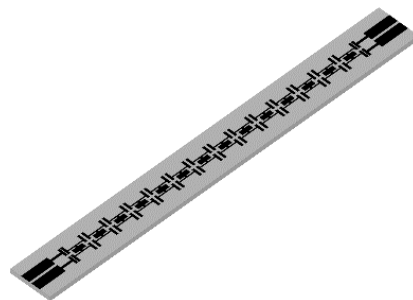
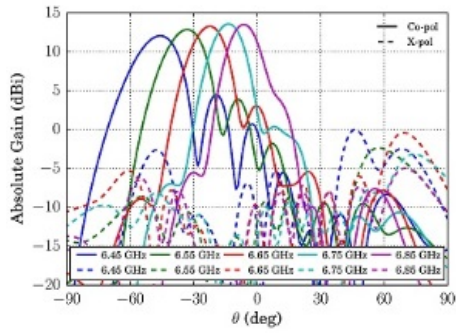
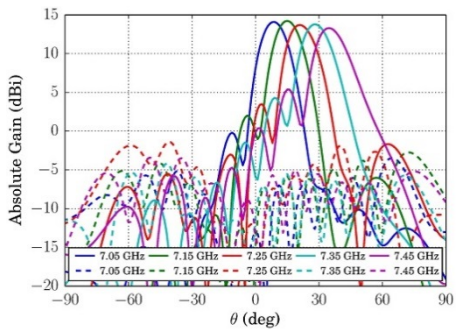


図1. 開発したメタマテリアルベース漏れ波アンテナ



(a) 左手系領域



(b) 右手系領域

図 2. 絶対利得の角度特性

(2) メタマテリアルベースアンテナの高速・高精度設計法の開発

メタマテリアルアンテナを IoT(Internet of Things)用のアンテナや図 1 のような漏れ波アンテナをガラスに装着して使用する場合には、アンテナ自体の狭帯域性や周囲の物体との相互作用のため、計算が収束しづらくなり、計算時間が大幅に増加することが一般に知られている。そこで本研究では、信号処理の分野で用いられる自己回帰移動平均推定法を FDTD 法に組み込む方法を開発した。これを、人体ファントム近傍のループアンテナの解析に定要した結果、計算時間は約 1/10 となり、計算精度は図 3 のように、広帯域に亘って極めて良好であることが分かった。

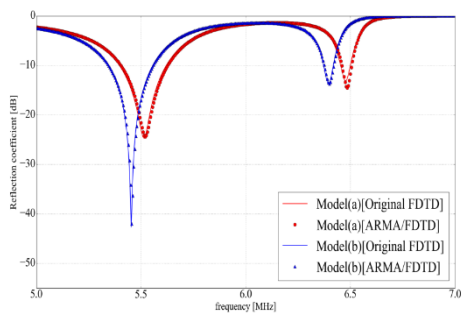


図 3 反射係数の周波数特性

(3) メタマテリアルインスパイアードアンテナ設計のための電磁界計算法

メタマテリアルインスパイアードアンテナとは、図 4 のように簡単な構造のアンテナの特性を近くに置いたメタマテリアルで制御しようとするものである。非周期アンテナが周期構造の近くにあたるため、両者の相互結合まで含めた膨大な時間が必要であるにも関わらず、計算精度は必ずしも向上しない。そこで本研究では、メタマテリアルを表面インピーダンスで置き換える方法について検討した。これが正確にできれば、表面インピーダンス壁近傍のアンテナの問題として取り扱うことができる。

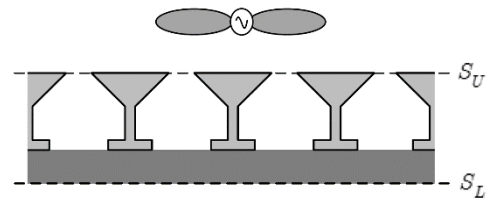


図 4 メタマテリアルインスパイアードアンテナ

図 5 のように、誘電体基板表面に周期的に配列された一辺が  $w$  の正方形パッチ導体に平面波が入射した場合の反射係数の位相特性を図 6 に示す。極めて広い周波数帯域に亘って正確に計算できていることがわかる。また、入射角に無関係に高精度であることも分かっている。

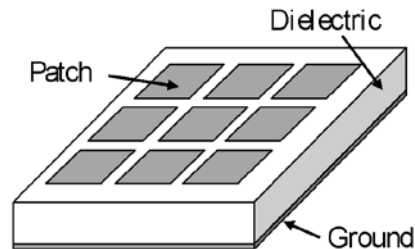


図 5 誘電体基板上的正方形導体

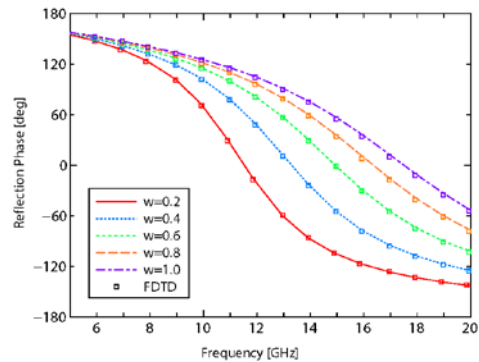


図 6 反射位相の周波数特性

(4) 実環境下メタマテリアルアンテナ設計のための多重領域 FDTD 法

ここで考えている実環境の例は、図 7 に示すように、車車間通信に用いられる車両のガラス表面に張り付けられたアンテナの解析で、アンテナとしてはビーム走査が必要であるから図 1 のようなメタマテリアルベースアンテナを考えている。

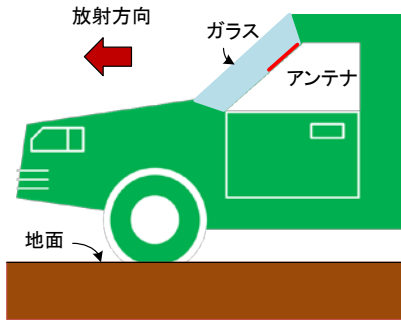


図 7 フロントガラス装着アンテナ

車車間の電波伝搬特性までは解析しようとすると、極めて広い解析空間が必要となり、現実的な計算機資源では不可能に近い。しかしながら、アンテナや主要な散乱体は局在して、その周りの空間は真空であることが多い。したがって、アンテナの周囲、あるいは散乱体の周囲だけを数値計算して、それらの相互作用は空間的な結合だけで解析できるような方法があると良い。本研究では、電磁界の等価定理を FDTD 法に取り入れることによってこれを解決した。これを MR/FDTD と呼ぶ。その有用性を確認するために、図 8 のような導体球近傍にダイポールアンテナがある場合の散乱電界を計算した。その結果を図 9 に示す。全体を FDTD 法だけで解析した値と良く一致していることから、精度良く解析できていると判断される。なお、階段近似による計算値は比較的大きな誤差を含んでいる。

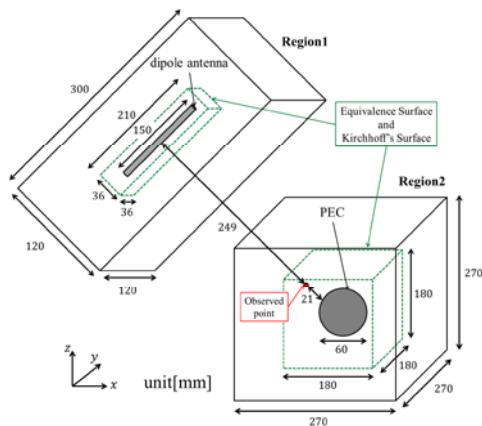


図 8 解析モデル

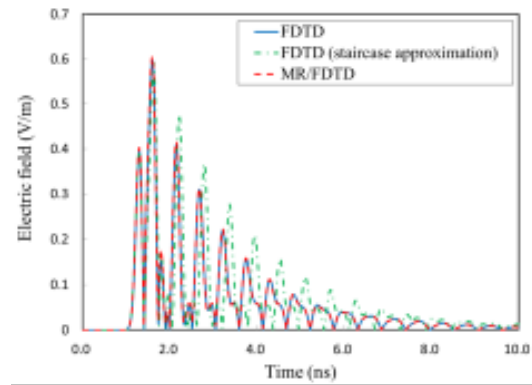


図 9 近傍電界

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Akie Kuriyama, Toru Uno and Takuji Arima, “Modification of Meta-film Surface Impedance Expression for Accurate Scattering Analysis of Meta-Surface Using Equivalent Transmission Line Model”, IEICE Communications Express, 査読有, 2017, vol. 6, no. 6, 2017, pp. 331-335. DOI:10.1587/comex.2016SPL0037
- ② Keita Asano, Toru Uno and Takuji Arima, “Acceleration of FDTD Calculation of EM Fields Due to Loop Antennas Used for MHz Band Wireless Transfer System Placed near Human Body”, IEICE Communications Express, 査読有, vol. 6, no. 6, 2017, pp. 325-330. DOI:10.1587/comex.2016SPL0036
- ③ Yujiro Kushiya, Takuji Arima and Toru Uno, “Differential-Type CRLH Leaky-Wave Antenna Using Stepped Impedance Resonators”, IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., 査読有, vo. 15, 2016, pp. 321-324. DOI:10.1109/LAWP.2015.2443130
- ④ 宇野亨, “メタマテリアル設計解析のための電磁界解析法”, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 査読有, no. 33, 2015, pp. 12-19. <http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine>

[学会発表] (計 20 件)

- ① 舟木大士, 宇野亨, 有馬卓司, 榎山祐次郎, “パッチ型 EBG の等価回路表現の適用範囲に関する検討”, 電子情報通信学総合大会, 2018.
- ② 山路雅和, 宇野亨, 有馬卓司, 榎山裕次郎, “傾斜した複数の領域による

- Multiple-Region/Dual-Grid FDTD 法”, 電子情報通信学ソサイエティ大会, 2017.
- ③ 有馬卓司, 宇野亨, “FDTD法における計算量低減法”, 電子情報通信学総合大会, 2017.
- ④ Yujiro Kushiya, Takuji Arima and Toru Uno, “Enhancement of Bandwidth for a TL Resonator Based CRLH Leaky Wave Antenna” International Symposium on Antennas and Propagation, 2017.
- ⑤ Pornanong Pongpaibool, Takuji Arima and Toru Uno, “Artificial Magnetic Conductor for Low-Profile and Human-Friendly IoT Antenna”, International Symposium on Antennas and Propagation, 2017.
- ⑥ Takuji Arima, Keita Asano and Toru Uno, “Low Frequency Antenna Analysis by FDTD Method by Utilizing Signal Processing Techniques” International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, 2017.
- ⑦ Takuji Arima and Toru Uno, “Metasurface Modeling Method in FDTD Analysis by Introducing Surface Impedance Boundary Conditions,” IEEE Conference on Computational Electromagnetics, 2017.
- ⑧ 榎山祐次郎, 有馬卓司, 宇野亨, “伝送線路共振器を用いた右手左手系漏れ波アンテナの設計”, 電子情報通信学ソサイエティ大会, 2016.
- ⑨ 栗山彰衛, 宇野亨, 有馬卓司, “メタサーフェスの伝送線路モデルによる散乱解析の精度について”, 電子情報通信学ソサイエティ大会, 2016.
- ⑩ 浅野慶太, 宇野亨, 有馬卓司, “FDTD法による ARMA アルゴリズムも用いた定常電磁界解析の高速化”, 電子情報通信学ソサイエティ大会, 2016.
- ⑪ 浅野慶太, 宇野亨, 有馬卓司, 古川洋之, 西村裕之, “FDTD法による有理関数モデルを利用した極低周波電磁界解析のためのマルチスケール解析手法”, 電子情報通信学会総合大会, 2016.
- ⑫ Yujiro Kushiya, Takuji Arima and Toru Uno, “CRLH Leaky-Wave Antenna using Transmission Line Resonators,” International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.
- ⑬ Keita Asano, Toru Uno and Takuji Arima, “ARMA/FDTD Analysis of Loop Antennas near Human Body for MHz Band Wireless Power Transfer System”, International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.
- ⑭ Akie Kuriyama, Toru Uno and Takuji Arima, “Application of Meta-film Surface Impedance to Equivalent Transmission Line Model of Meta-Surface for Scattering Analysis”, International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.
- ⑮ Yujiro Kushiya, Takuji Arima and Toru Uno, “Design of CRLH Transmission Lines with Stepped Impedance Resonators”, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, 2016.
- ⑯ Takuji Arima, Masahiro Gunji and Toru Uno, “Effective Modeling Method of Metamaterials in FDTD Method by Utilizing Surface Impedance Boundary Conditions”, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, 2016.
- ⑰ 小畑輝, 宇野亨, 有馬卓司, “Multiple Region/Dual Frid-FDTD法の有効性について”, 電子情報通信学会技術報告, 2015.
- ⑱ 栗山彰衛, 宇野亨, 有馬卓司, “メタマテリアルの高精度な回路解析法についての研究”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015.
- ⑲ Takuji Arima, Akie Kuriyama and Toru Uno, “ARMA/FDTD Technique for Reflection Properties of Periodic Structures at Oblique Incidence and Developing Wide Angle EBG Application”, IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2015.
- ⑳ Takuji Arima, Kenta Kuwabara and Toru Uno, “Mhz Range Analysis by FDTD/Autoregressive Moving Average Model Method,” URSI Atlantic Radio Science Conference 2015.

[図書] (計1件)

- ① 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, コロナ社, 数値電磁界解析のための FDTD 法 —基礎と実践—, 2016, 378(pp1-275).

[その他]

ホームページ等  
<http://www.tuat.ac.jp/~uno>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宇野 亨 (UNO, Toru)  
 東京農工大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号：80176718

### (2) 研究分担者

有馬 卓司 (ARIMA, Takuji)  
 東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号：20361743